干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

生态重要性视角下东北林区县域生态安全格局研究
——以呼伦贝尔市阿荣旗为例

李伊彤[1,2]， 荣丽华[1]， 李文龙[3,4]， 程 磊[2]

（1. 内蒙古工业大学，内蒙古 呼和浩特 010051；2. 中国建筑科学研究院有限公司，北京 100013；
3. 内蒙古财经大学，内蒙古 呼和浩特 010070；4. 中国科学院地理科学与资源研究所/陆地表层格局与模拟重点实验室，北京 100101）

摘 要：县域生态安全格局构建对于保障我国生态安全、优化县域生态空间格局具有重要意义。基于内蒙古呼伦贝尔市阿荣旗生态系统服务功能重要性评价结果，利用景观形态空间格局分析（MSPA）模型识别生态核心区作为生态源地，基于生态阻力因子与生态威胁因子构建阻力栅格，运用电路理论识别生态廊道、夹点以及改善区，构建阿荣旗综合生态安全格局。结果表明：（1）阿荣旗生态极重要区面积4181.66 km²，占全旗面积的37.80%，生态重要区面积2174.50 km²，占全旗面积的19.80%，阿荣旗整体生态系统服务功能重要性较高。（2）生态源地共有33块，占地面积1141.00 km²，主要分布于旗域北部区域，其中乔木林地是生态源地主要用地类型。（3）构建生态廊道共73条，其中关键廊道62条，潜在廊道11条，总面积为1884.80 km²，生态廊道网络化结构完整，呈“北密南疏”分布状态。（4）共识别夹点区面积71.25 km²，提取重要夹点38个，一级改善区面积176.65 km²，主要分布于旗域南部；二级改善区面积887.12 km²，主要分布于旗域南部与西北部。对各景观生态要素进行总体规划，宏观上形成“一屏两区，一网多点”的生态安全格局，为国土空间格局优化提供了现实路径和科学指引。

关 键 词：林区；生态安全格局；景观形态；电路理论；生态空间规划；呼伦贝尔市阿荣旗
文章编号：

县域生态空间承担着“上承格局、下引实施”的重要作用，是国家生态空间规划与生态修复的关键层级[1]，通过构建生态安全格局（ESP）合理引导生态空间健康、可持续发展成为缓解经济发展与环境保护矛盾的重要手段[2]。东北林区县域生态环境本底质量良好，但是随着人类活动的加剧，致使出现生态用地规模减少、生物多样性下降、景观格局破碎化等威胁生态安全的问题[3]，如何保障国土生态安全成为当下林区县域可持续发展过程中亟需解决的问题之一。生态系统服务功能是人类赖以生存与发展的基础[4-5]，只有科学的评价生态系统服务功能，才能合理构建县域生态安全格局，为林区生态格局优化和生态功能提升提供科学依据。

生态系统服务直接或间接为人类提供生存补给的基础功能[6]，是度量生态系统健康程度的重要因子[5,7]。随着生态系统服务功能评价相关研究不断深入，评价模型方法也逐渐多元，主流方法有当量法[8]、InVEST模型[9]、净初级生产力（NPP）评估法[10-11]等。随着国土空间规划的快速推进，生态系统服务功能重要性评价成为“双评价”[12]、生态保护红线划定[10-11]中衡量国土生态安全的重要指标，通过定量评估研究区各项生态服务功能[11,13]，得出生态系统

收稿日期：2021-12-01； **修订日期：**2022-02-04
基金项目：国家自然科学基金地区科学基金项目（51868057）；教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目（19ZJD014）；内蒙古自治区教育科学研究“十三五”规划2020年度立项课题（NGJGH2020049）资助
作者简介：李伊彤（1995-），男，博士在读，主要从事内蒙古草原地区城镇及聚落适宜性规划方法研究. E-mail: 1208833755@qq.com
通讯作者：荣丽华（1972-），女，教授，博士生导师，主要从事内蒙古草原地区城镇及乡村城乡规划实践与研究. E-mail: 2797864545@qq.com

服务功能重要性区划，为保障国土生态安全提供空间依据。从狭义角度而言，生态安全是生态系统健康水平与生态系统完整性的集中体现，从广义角度而言，是人类生存能力不受环境威胁的能力，是集合人工与自然的复合巨系统[14]。生态安全相关研究多以人类开发自然资源的规模和阈限为视角，研究水资源[15]、土壤[16]、生态系统健康状态[17]等对人类生存与发展的影响。随着国土空间规划工作的全面展开，国土开发格局优化提升至战略高度，生态安全格局作为三大战略目标之一[18]，是区域国土空间开发战略落实的重要依据[19]。国内外学者以生态安全格局为手段，提高地区生态环境质量，调控生态过程[20-21]，保证区域健康可持续发展[22]。目前生态安全格局构建思路逐步形成“生态源地-生态阻力面-生态廊道”研究框架[23]，主流的分析模型为最小阻力模型(MCR)，通过累积阻力值计算，识别源地之间的最小成本路径[12,24]，却忽略了生物随机游走的特性，从而不能反映生态廊道的真实宽度[25]。因此，本研究选择电路理论识别生态廊道[25-28]，以构建阿荣旗生态安全格局。

本文针对阿荣旗生态空间结构破坏、功能退化、人地关系矛盾突出等一系列生态安全问题，定量评估研究区水源涵养生态服务功能[13]、生物多样性生态服务功能[13]、防风固沙生态服务功能[29]、水土保持生态服务功能[13]，以此为基础识别重要生态空间核心区作为生态源地[5,30]；并运用电路理论识别生态廊道，利用 Linkage Mapper 工具和 Circuitscape 软件(http://www.circuitscape.org/)识别生态廊道、夹点和改善区[25-28]，通过与土地利用的比对校核，实现点、线、面的生态安全网络构建，以期为小区域国土空间优化、生态空间规划、生态修复等空间发展策略的制定提供理论与方法上的支撑。

1 研究区概况

阿荣旗(122°02′~124°05′E，47°56′~49°19′N)位于内蒙古自治区呼伦贝尔市东南部，背靠大兴安岭，是呼伦贝尔市连接东北三省的南大门，下辖8个建制镇、4个少数民族乡、7个地方林场、2个国营农场，共有148个行政村。旗域总面积约13600 km²，截至2019年末，全旗总人口约32×10⁴人。全旗地势由西北向东南阶梯式下降，海拔198~1149 m。阿荣旗境内有耕地314400 hm²，优质天然草牧场156467 hm²，林地594667 hm²，森林覆盖率达到54.2%(图1)。阿荣旗下辖索尔奇国家湿地公园，具有重要的生态服务功能。农业空间主要集中于阿荣旗中部、南部，生态空间主要集中于旗域北部及东部。阿荣旗北接大兴安岭，林业资源丰富，生态环境质量良好，具有东北林区旗县典型生态环境特征。

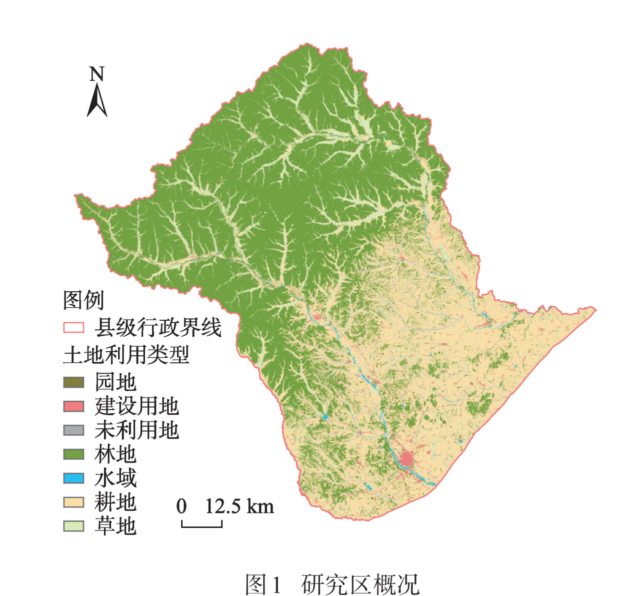


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源

1998—2018年气温、降水、风速和太阳辐射等气象类数据源自国家气象科学数据共享服务平台(http://data.cma.cn/)，通过克里金插值法得出空间分布栅格，插值精度控制在30 m×30 m；数字高程模型(DEM)数据取自空间地理数据云平台(http://www.gscloud.cn/)，采用30 m×30 m精度，用作地形要素分析；2018年土地利用数据来源于资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)，采用30 m×30 m精度数据；2018年Landsat-8OL遥感影像数据来源于空间地理数据云平台(http://www.gscloud.cn/)，全波段30 m×30 m 精度栅格数据；土壤栅格数据(1:1000000)来源于联合国粮农组织和维也纳国际应用系统研究所构建的世界土壤数据库(HWSD)(http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/)。

2.2 数据处理

（1）CASA模型估算NPP

基于CASA（Carnegie-ames-stanford approach）模型[31-32]估算阿荣旗2005、2010、2015年和2018年NPP，将植被类型、时间序列归一化植被指数（NDVI）、月均温、月总降水、月总太阳辐射导入基于ENVI平台的NPP计算插件，得出30 m×30 m的NPP数据，由于CASA模型较为适用于大尺度空间NPP计算，对于旗县尺度需要进行数据校正。将计算出的数据与资源环境数据云平台同期1000 m×1000 m栅格数据均质化同位置采样20组计算矫正参数，求得校正参数值为0.872，随即对CASA模型计算出的NPP进行0.872倍校正，以期更加准确地反映空间分布。

（2）土壤渗流能力因子（F_{sic}）计算

根据土壤质地类型，将不同土壤质地赋值。运用ArcGIS软件打开世界土壤数据库（HWSD），将T_USDA_TEX字段分类赋值，并归一化处理，得到土壤渗流因子栅格图。

（3）土壤可蚀性因子（K）计算

$$K=(-0.01383+K_{EPIC})\times 0.1317 \tag{1}$$

$$K_{EPIC}=\left\{0.2\times 0.3\exp\left[-0.0256m_s\left(1-\frac{m_{silt}}{100}\right)\right]\right\}\times \left[\frac{m_{silt}}{m_c+m_{silt}}\right]^{0.3}\times\left\{1-\frac{0.25orgC}{\left[orgC+\exp\left((3.72-2.95)orgC\right)\right]}\right\}\times \left\{1-0.7(1-m_s/100)/\left[\left(1-\frac{m_s}{100}\right)+\exp\left(-5.51+22.9\left(1-\frac{m_s}{100}\right)\right)\right]\right\} \tag{2}$$

式中：K_{EPIC}为修正前的土壤可蚀性因子；K为修正后的土壤可蚀性因子；m_c、m_{silt}、m_s和orgC分别为黏粒（<0.002 mm）、粉粒（0.002~0.05 mm）、砂粒（0.05~2 mm）和有机碳的百分比含量（%）。

（4）多年平均气候侵蚀能力（F_q）计算

$$F_q=\frac{\sum_{i=1}^{12}u^3\left\{\frac{ETP_i-P_i}{ETP_i}\right\}}{100}\times d \tag{3}$$

$$ETP_i=0.19(20+T_i)^2\times(1-r_i) \tag{4}$$

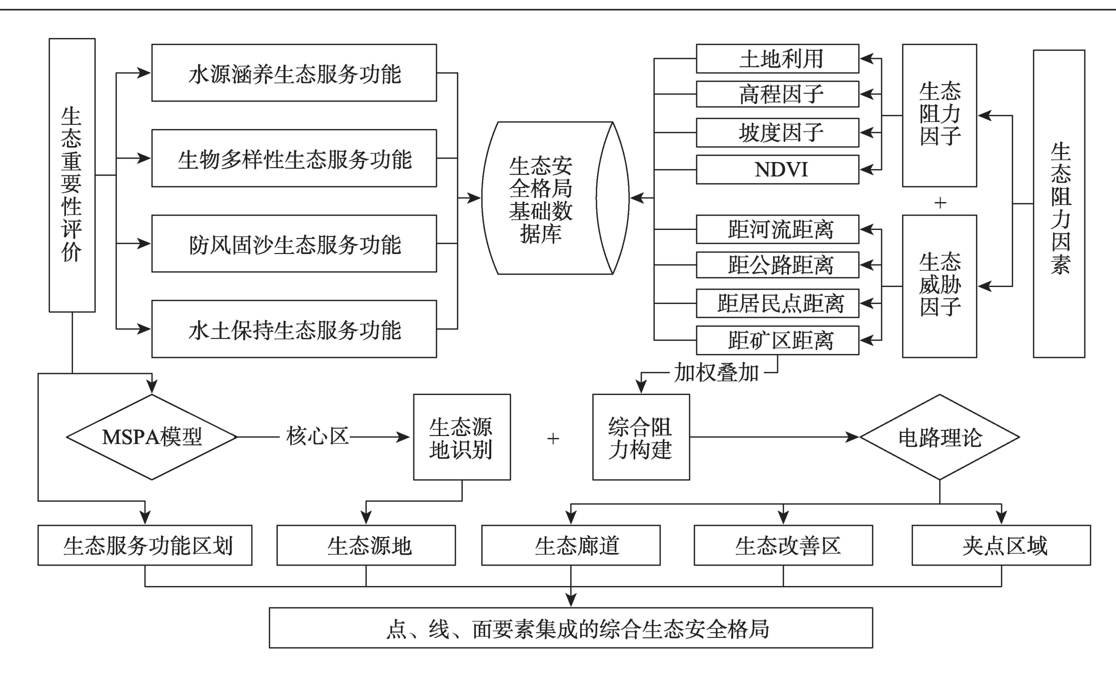
式中：F_q为多年平均气候侵蚀力因子指数值；u为2 m高处的月平均风速（m·s^{-1}）；ETP_i为月潜在蒸发量（mm）；P_i为月降水量（mm）；d为当月天数（d）；T_i为月平均气温（°C）；r_i为月平均相对湿度（%）。潜在蒸发量、月降水量等气象数据均采用克里金插值法计算。

2.3 研究方法

本研究在梳理了生态系统服务功能重要性评价与生态安全格局相关研究的基础上，形成了以生态重要性评价为基础的林区县域生态安全格局研究框架（图2）。（1）在生态重要性评价部分，采用以NPP为基础数据的评价方法，计算阿荣旗各项生态服务功能栅格，得到生态服务功能区划的同时，为生态源地识别提供支撑；（2）在生态源地识别方面，对生态重要性评价结果实现景观形态空间格局分析，识别“核心区”作为基础生态源地；（3）在阻力面构建方面，综合分析阿荣旗生态阻力因子与人工威胁因子，通过加权叠加构建综合阻力面；（4）运用电路理论模型方法，识别阿荣旗生态廊道、夹点以及改善区。最终构建出点、线、面要素集成的林区县域生态安全格局。

2.3.1 生态源地评价 生态源地是生物扩散、维持的“源”点，一方面为系统提供基础的生态服务，另一方面维持景观格局形态完整性、保障生态安全[33]。本文以30 m×30 m的NPP为基础数据，定量评估阿荣旗水源涵养生态服务功能[13]、生物多样性生态服务功能[13]、防风固沙生态服务功能[29]、水土保持生态服务功能[13]，计算过程如表1所示。采用层次分析法计算4项生态服务功能权重，将其依0.30、0.25、0.25、0.30加权叠加，得出生态重要性评价结果。依托评价结果提取生态极重要区赋值为1，其他区域赋值为0，运用景观形态空间格局分析（MSPA）模型设置边缘宽度为2，将生态极重要区域的核心区作为基础生态源地，由于阿荣旗下辖索尔奇国家湿地公园具有重要生态服务功能，因此也将其纳入生态源地范畴。

2.3.2 生态阻力面构建 在自然生态系统中，物质和能量的流动传递以及物种的迁徙流通会受到土地覆被类型、生态环境因素、人为干扰因素的影响，从而对生态连通过程产生一定阻力[34-35]。本文根据阿荣旗生态环境特征，结合专家意见及相关文献[12,25]，从生态阻力维度与生态威胁维度共遴选8项指标因子，作为生态廊道构建的阻力因素，运用专家打分法为阻力因子赋权重（表2），通过各因子加权叠加，



注：MSPA为形态学空间格局分析；NDVI为归一化植被指数。下同。

图2　技术路线

Fig. 2　Technology route

表1　生态服务功能评价

Tab. 1　Evaluation of ecological service function

评价因子	计算过程
水源涵养服务功能	$WR = NPP_{mean} \times F_{sic} \times F_{pre} \times (1 - F_{slo})$ 式中：WR为水源涵养服务能力指数；NPP_{mean}为多年植被平均净初级生产力(g C·m^{-2}·a^{-1})；F_{sic}为土壤渗流能力；F_{pre}为多年平均降水因子；F_{slo}为坡度因子。
水土保持服务功能	$S_{pro} = NPP_{mean} \times (1 - K) \times (1 - F_{slo})$ 式中：S_{pro}为水土保持服务能力指数；NPP_{mean}为多年植被平均净初级生产力(g C·m^{-2}·a^{-1})；K为土壤可蚀因子；F_{slo}为坡度因子。
防风固沙服务功能	$S_{ws} = NPP_{mean} \times K \times F_q \times D$ 式中：S_{ws}为防风固沙服务能力指数；NPP_{mean}为多年植被平均净初级生产力(g C·m^{-2}·a^{-1})；K为土壤可蚀因子；F_q多年平均气候侵蚀力；D为地表粗糙度因子，$D=1/\cos(\theta)$，其中θ为坡度(°)。
生物多样性服务功能	$S_{bio} = NPP_{mean} \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1 - F_{alt})$ 式中：S_{bio}为生物多样性保护服务能力指数；NPP_{mean}为多年植被平均净初级生产力(g C·m^{-2}·a^{-1})；F_{pre}为多年平均降水因子；F_{tem}为多年平均气温参数；F_{alt}为海拔参数。

得到综合生态阻力因子。

2.3.3　*基于电路理论的生态廊道分析*　生态廊道是指线性的、连接网络中心和重要节点斑块资源的廊道，为动植物的迁徙、繁殖等过程提供了通道和场所[22]。本研究基于电路理论中连接模型与随机游走模型估算最小成本路径[36]，以ArcGIS为分析平台，调用Linkage Mapper中Linkage Pathways Tool模块，采用“成对”模式识别节点之间的最小成本距离，识别阿荣旗关键生态廊道与潜在生态廊道；随后，调用Pinch Point Mapper工具迭代计算累积电流值，累积电流值高的区域表征物种在生态廊道中“流通”的关键节点区，即为“夹点”区域；最后，运用Barrier Mapper工具，通过障碍分析得到“源点”间生态廊道的改善系数，即系数越大，需要通过改善增强廊道连通性的必要程度越高[36-37]。

3　结果与分析

3.1　生态服务功能区划

通过生态服务功能计算，运用自然间断点法将

表2 生态安全格局阻力设定

Tab. 2 Resistance setting of ecological security pattern

阻力因子	分级指标	阻力系数	权重	威胁因子	分级指标	阻力系数	权重
土地利用	林地	10	0.15	距河流距离/m	500	10	0.1
	灌木	20			800	30	
	草地	30			1200	50	
	水体	50			1800	70	
	耕地	70			>1800	90	
	其他地类	90					
高程因子/m	<300	10	0.15	距公路距离/m	500	90	0.08
	300~500	30			800	70	
	500~800	50			1200	50	
	800~1000	70			2000	30	
	1000~1500	90			>2000	10	
坡度因子/(°)	0~8	10	0.17	距居民点距离/m	300	90	0.07
	8~15	30			500	70	
	15~25	50			800	50	
	25~35	70			1200	30	
	>35	90			>1200	10	
归一化植被指数(NDVI)/%	65	90	0.23	距矿区距离/m	200	90	0.05
	75	70			500	70	
	85	50			1000	50	
	95	30			2000	30	
					>2000	10	

评价栅格分为2类，确定阿荣旗生态服务功能区划。结果表明，阿荣旗水源涵养功能区面积为1554.85 km²，占全旗面积的14.04%；水土保持功能区面积为2904.52 km²，占全旗面积的26.22%；防风固沙功能区面积为1121.00 km²，占全旗面积的10.12%；生物多样性功能区面积为621.82 km²，占全旗面积的5.62%。由于各类生态服务功能区划之间存在交集，因此将相交部分定义为复合生态服务功能区，其余不相交区域为单一生态服务功能区，阿荣旗防风固沙功能区面积为24.38 km²，水土保持功能区面积为1294.03 km²，生物多样性保护功能区面积为35.45 km²，水源涵养功能区面积为287.55 km²，复合生态功能区面积为1787.91 km²，生态服务功能区占全旗面积的30.96%(图3)。

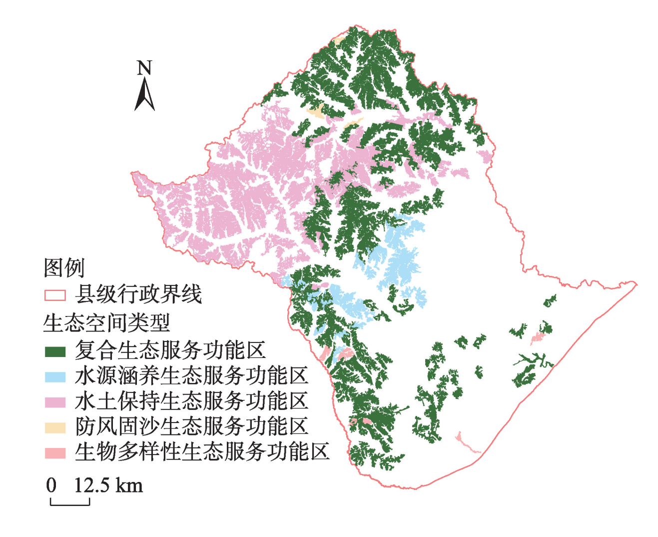


图3 生态服务功能区划

Fig. 3 Zoning of ecological service functions

通过对水源涵养重要性、水土保持重要性、防风固沙重要性、生物多样性保护重要加权叠加得出生态重要性评价栅格，并将其通过自然间断点法分为极重要、重要、一般重要(图4)。生态极重要区面积4181.66 km²，占全旗面积的37.80%，生态重要区面积2174.50 km²，占全旗面积的19.80%，两者共占全旗面积的57.60%，阿荣旗整体生态系统服务功能重要性较高。生态极重要区主要分布于阿荣旗北部林区，为地区生态系统健康提供保障，生态一般重要区主要分布于霍尔奇镇、亚东镇、兴安镇等以农业生产为主的区域，农业生产对地区生态系统服务功能影响较小。

3.2 生态源地识别及分析

运用MSPA模型识别生态服务功能评价结果的核心区，选取面积大于500 hm²的生态核心区作为生态源地；通过分析共识别生态源地32块，为了使源地的识别更加准确，本研究在生态重要性评价结果的基础上，选择国家自然保护区、国家级森林地质

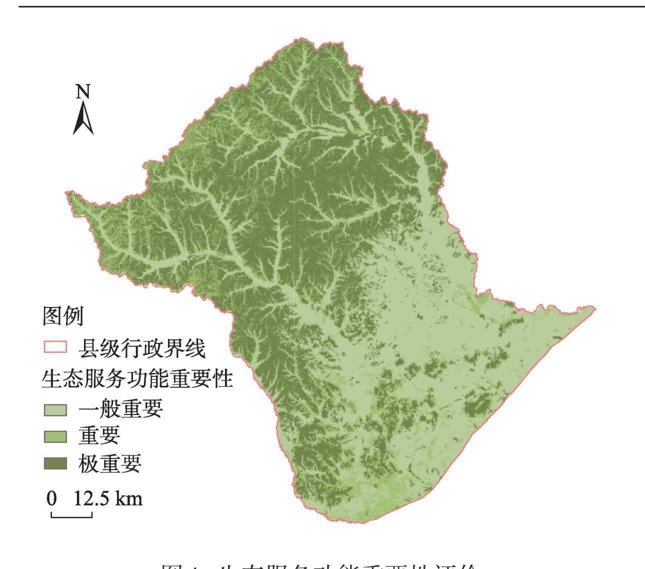


图4 生态服务功能重要性评价

Fig. 4 Evaluation of the importance of ecological service functions

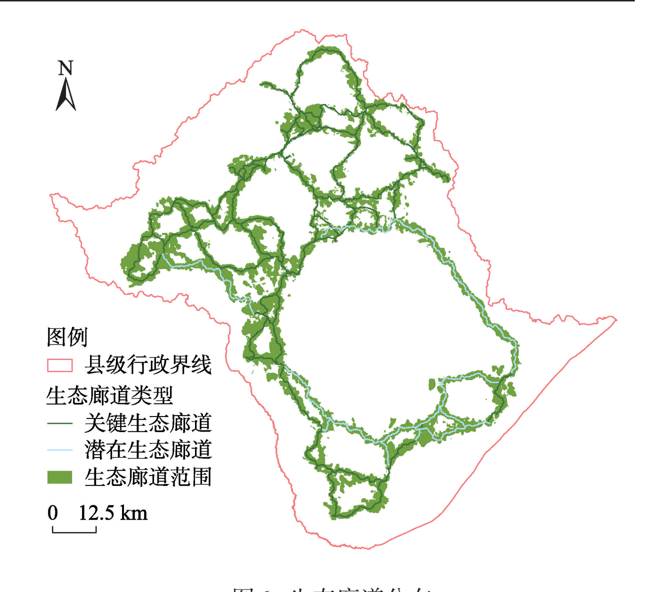


图6 生态廊道分布

Fig. 6 Distribution of ecological corridors

公园等作为生态源地。综上,阿荣旗共提取生态源点33个(图5)。乔木林地是生态源地的主要用地类型,占生态源地总面积的87.93%,其次是灌木林地、旱地、天然牧草地,分别占生态源地面积的5.20%、2.67%、1.43%;建设用地由于其生态服务功能较差,绝大多处于区域非源地范围,占生态源地总面积的0.0012%,主要分布于乔木林地、灌木林地等用地周边,为生态空间保护起到缓冲作用,因此也将其纳入生态源地范畴之内。

3.3 生态廊道分布及特征

生态廊道连接生态源地(源点),保证地区景观完整性的同时增强地区生态效益,是保障区域生态安全的重要线性空间。研究区生态廊道主要分布于阿荣旗北部的森林区域,基本避开中部农田区域,呈现"北密南疏"的空间分布形态。分析可知,研究区连接33块核心源地有73条生态廊道,其中关键廊道62条,潜在生态廊道11条(图6);生态廊道总面积为1884.80 km²,占全旗面积的13.85%。

从土地利用角度分析(图7),生态廊道中林地占据绝对主导地位,占廊道总面积的58.36%;草地处于生态廊道边缘,起到缓冲区的作用,占廊道总面积的16.04%;潜在生态廊道用地主要以耕地、水域为主,在生态修复过程中可有针对性提升农田、水域的生态服务功能,提升区域景观格局完整性;

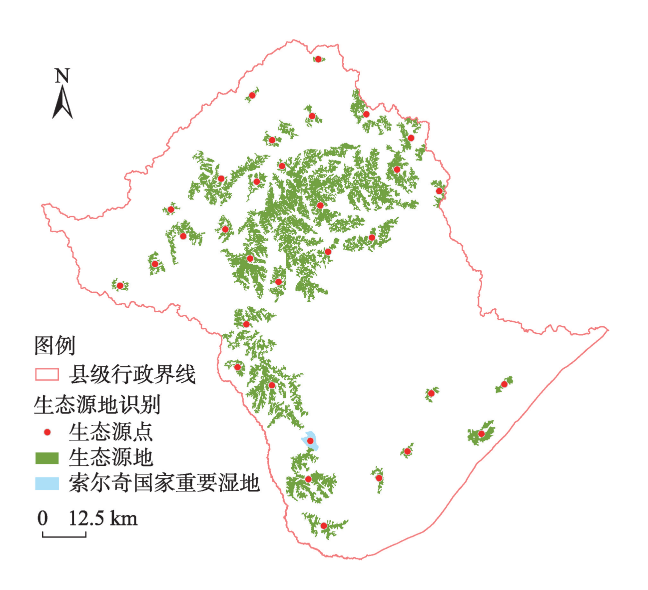


图5 基于MSPA模型的生态源地识别

Fig. 5 Ecological source identification based on MSPA model

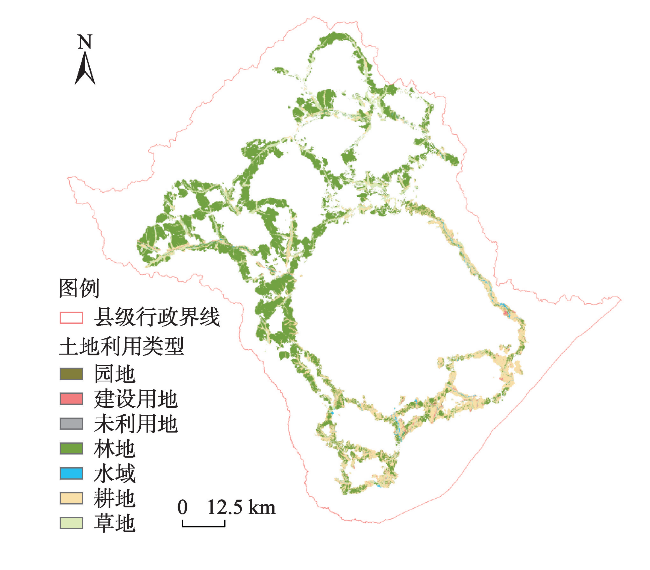


图7 生态廊道中土地利用类型

Fig. 7 Land use types in ecological corridor

园地、建设用地、未利用地占比较小，分别占廊道总面积的0.75%、1.28%、0.62%。

3.4 “夹点”区域及生态改善区识别

通过自然断点法将累积电流值分为3类，值域最高的区域视为夹点区域(图8)。分析可知阿荣旗夹点区面积共71.25 km^2，其中夹点区域主要分布于阿荣旗西北部，东北部夹点较少，生态网络联通性较差；南部小型生态源地在生态系统中发挥着“踏脚石”作用，故而南部、东南部夹点较为集中且呈线性分布。根据夹点区空间分布状态，提取出38个夹点用于生态保护与改善。

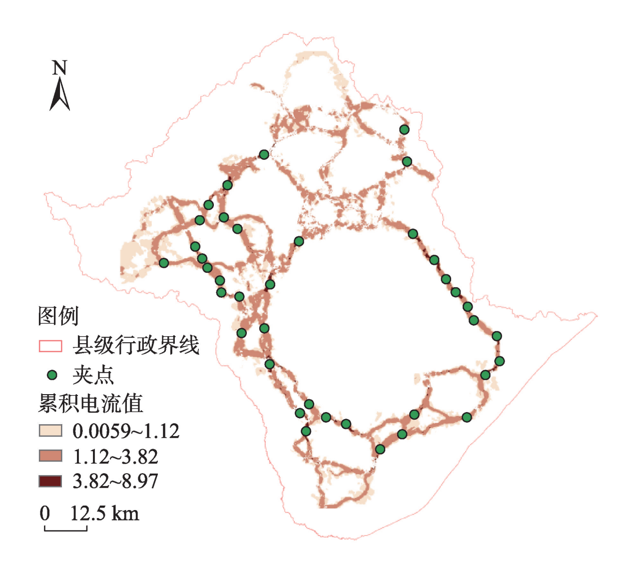


图8 夹点区域空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of pinch point region

通过以500 m为搜索半径的移动窗口法计算各像元最大改进分值[37]，将结果采用自然断点法分为3类，取最高值与次高值定义为一级改善区与二级改善区(图9)。分析得，一级改善区面积176.65 km^2，由于阿荣旗南部农业、采矿业活跃，因此一级改善区主要分布于旗域东南部；二级改善区面积887.12 km^2，主要分布于阿荣旗南部与西北部，围绕一级改善区布局，受居民点分布及农业发展影响。就整体而言，改善区主要结合潜在生态廊道分布，对该区域的改善及修复有助于地区生态安全状态的提升。

4 讨 论

综上，阿荣旗生态环境良好，具有重要的生态服务功能，复合生态服务功能区呈现自东北至西南

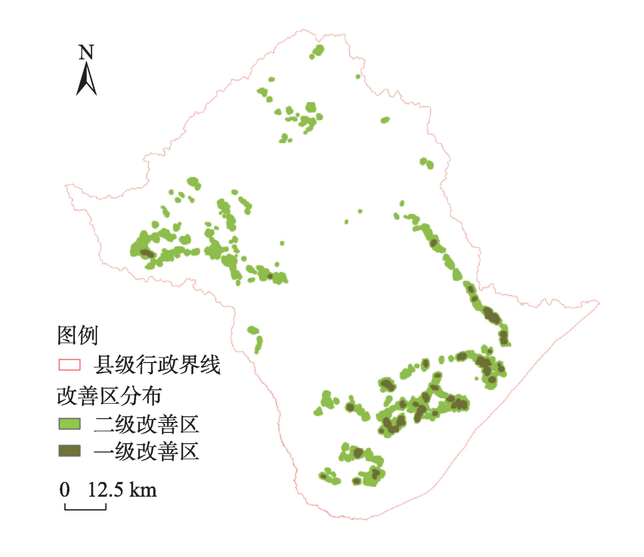


图9 生态改善区范围

Fig. 9 Range of ecological improvement

“带状”分布，水土保持功能区主要集中于旗域西北部，水源涵养功能区集中于旗域中部，形成了“一屏两片区”的生态系统重要性空间区划。识别阿荣旗生态源地、“夹点”以及改善区，形成多节点的空间分布状态，阿荣旗生态廊道网络化结构较为完整，呈“北密南疏”分布状态。以阿荣旗生态重要性评价为基础，构建由“点”、“线”、“面”景观生态要素构成的空间格局，最终形成“一屏两片区，一网多节点”的生态安全格局(图10)。由于阿荣旗“北林南农”的地理特征，生态空间格局南北分异较大。北部生态服务功能较高、重要生态廊道分布密集，区域内生态源地之间均有重要廊道相连接，生态系统稳定性、抵抗风险能力较强，但西北部仍然存在廊道相对狭窄的夹点，需通过降低周边生态阻力以提升廊道之间物质能量流通能力。南部生态服务功能较差、潜在生态廊道分布集中，以改善区、夹点为空间依据对潜在生态廊道实施生态修复，有利于增强地区生态系统完整性，保障地区生态安全。

本文以生态系统重要性评价结果依托，综合分析阿荣旗水源涵养生态服务功能、生物多样性生态服务功能、防风固沙生态服务功能、水土保持生态服务功能，构建林区县域生态空间区划的同时，基于生态阻力因素与生态威胁因素分析，以电路理论为研究方法识别区域生态廊道、夹点、改善区分布；在继承传统生态安全格局构建中“生态源地-生态阻力面-生态廊道”[12,23]的研究框架的同时，充分考虑了物种迁徙的随机游走性，为生态安全格局构建

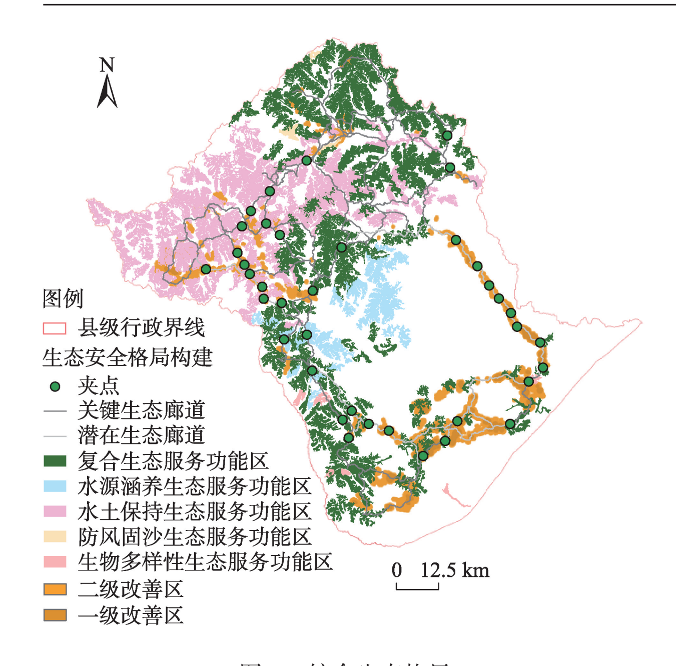


图10 综合生态格局

Fig. 10 Integrated ecological pattern

提供新思路。研究结论更加聚焦于小区域尺度，结果更加精细化，在国土空间规划背景下有利于县域生态修复的工程实施与空间导控政策制定。

在研究过程中存在如下不足：(1) 由于阿荣旗气象站点分布较少，采用克里金空间插值法计算气温、降水、风速等要素栅格虽然可以宏观反应区域差异，但数据处理精度会造成一定误差；(2) 以NPP为基础数据的生态系统服务功能重要性评价较为适用于大尺度空间计算，是否适用于小区域研究值得进一步探讨；(3) 生态系统服务功能计算过程中，阈值、权重等参数的界定中均以人为主观经验为主导，虽经相关专家意见校核，但依然缺乏定量依据。

后续研究，需将NPP法生态系统服务功能计算结果与InVEST计算结果校核，以期更加科学的反应生态功能区划。同时应加入对时间维度的研究，探讨地区生态安全格局形成的过程与机制，为今后的生态空间发展提供指引。

5 结 论

基于生态服务功能评价及电路理论，通过对阿荣旗生态源地、生态廊道、夹点以及整体生态格局进行分析，得到如下结论：

(1) 阿荣旗生态极重要区面积4181.66 km^2，占全旗面积的37.80%，生态重要区面积2174.50 km^2，占全旗面积的19.80%，两者共占全旗面积的57.60%，阿荣旗整体生态系统服务功能重要性较高。

(2) 阿荣旗生态源地共有33块，占地面积1141.00 km^2，占全旗面积的10.30%，主要分布于旗域北部区域，乔木林地是生态源地的主要用地类型。

(3) 生态廊道共73条，其中关键廊道62条，潜在廊道11条，总面积为1884.80 km^2，占全旗面积的13.85%，总长度约2496 km连接生态源地，生态廊道网络化结构完整，呈"北密南疏"分布状态。

(4) 共识别夹点区面积71.25 km^2，提取重要夹点38个，一级改善区面积176.65 km^2，主要分布于旗域南部；二级改善区面积887.12 km^2，主要分布于旗域南部与西北部。

总体而言，阿荣旗因丰富的林草资源，生态安全状况较好，对维护生态系统稳定提升地区生态环境质量做出重要贡献；但是，随着人类活动的加剧，生态连通性被破坏，一定程度上阻碍了生态服务功能的正常运行。因此，从生态安全格局入手，开展生态修复工程是生态空间规划中的重要内容。

致谢：感谢草原人居环境科学与技术创新人才团队对本研究的支持。

参考文献(References)

[1] 李立峰, 徐进勇, 祝文明. 县域生态空间系统化修复路径与实践[J]. 规划师, 2020, 36(22): 12-18. [Li Lifeng, Xu Jinyong, Zhu Wenming. Systematic repair of county area ecological space[J]. Planners, 2020, 36(22): 12-18.]

[2] 冯琰玮, 甄江红, 马晨阳. 内蒙古生态承载力评价及生态安全格局优化[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1096-1110. [Feng Yanwei, Zhen Jianghong, Ma Chenyang. Evaluation of ecological carrying capacity and optimization of eco-logical security pattern in Inner Mongolia[J]. Geographical Research, 2021, 40(4): 1096-1110.]

[3] 甄江红, 王亚丰, 田圆圆, 等. 城市空间扩展的生态环境效应研究——以内蒙古呼和浩特市为例[J]. 地理研究, 2019, 38(5): 1080-1091. [Zhen Jianghong, Wang Yafeng, Tian Yuanyuan, et al. Study on ecological environment effects of urban spatial expansion: Taking Inner Mongolia Hohhot City as an example[J]. Geographical Research, 2019, 38(5): 1080-1091.]

[4] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6183-6188. [Ouyang Zhiyun, Zheng Hua. Ecological mechanisms of ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6183-6188.]

[5] 肖杨, 周旭, 蒋啸, 等. 基于生态系统服务功能评价的贵阳市生

态安全格局维护研究[J]. 生态科学, 2020, 39(4): 244-251. [Xiao Yang, Zhou Xu, Jiang Xiao, et al. Research on ecological security maintenance of Guiyang City based on evaluation of ecosystem service function[J]. Ecological Science, 2020, 39(4): 244-251.]

[6] 曹祺文, 张曦文, 马洪坤, 等. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架: ESRISK[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 843-855. [Cao Qiwen, Zhang Xiwen, Ma Hongkun, et al. Review of landscape ecological risk and an assessment framework based on ecological services: ESRISK[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 843-855.]

[7] Costanza R, D'Arge R, DeGroot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387 (6630): 253-260.

[8] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30 (8): 1243-1254.]

[9] Crossman N D, Burkhard B, Nedkov S, et al. A blueprint for mapping and modelling ecosystem services[J]. Ecosystem Services, 2013, 4: 4-14.

[10] 环境保护部, 国家发展改革委. 生态保护红线划定指南[DB/OL]. [2017-07-20]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.html. [Ministry of Environmental Protection, National Development and Reform Commission. Guidelines for the delineation of ecological protection red lines[DB/OL]. [2017-07-20]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.html.]

[11] 王丽霞, 邹长新, 王燕, 等. 基于GIS识别生态保护红线边界的方法——以北京市昌平区为例[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6176-6185. [Wang Lixia, Zou Changxin, Wang Yan, et al. Methods to identify the boundary of ecological protection red line regions using GIS: A case study in Changping, Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6176-6185.]

[12] 于成龙, 刘丹, 冯锐, 等. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 290-301. [Yu Chenglong, Liu Dan, Feng Rui, et al. Construction of ecological security pattern in northeast China based on MCR model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 290-301.]

[13] 陈涛, 叶有华, 孙芳芳, 等. 基于SPOT数据的深圳市生态系统服务功能重要性评价[J]. 生态经济, 2018, 34(2): 151-157. [Chen Tao, Ye Youhua, Sun Fangfang, et al. Assessment on the importance of ecosystem service function in Shenzhen City based on SPOT data[J]. Ecological Economy, 2018, 34(2): 151-157.]

[14] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768. [Ma Keming, Fu Bojie, Li Xiaoya, et al. The regional pattern for ecological security (RPES): The concept and theoretical basis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 761-768.]

[15] 贾梦圆, 陈天. 基于土地利用变化模拟的水生态安全格局优化方法——以天津市为例[J]. 风景园林, 2021, 28(3): 95-100. [Jia Mengyuan, Chen Tian. Identifying and optimizing hydro-ecological security pattern with land use change modeling: A case study of Tianjin[J]. Landscape Architecture, 2021, 28(3): 95-100.]

[16] 赵方凯, 杨磊, 陈利顶, 等. 城郊生态系统土壤安全:问题与挑战[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4109-4120. [Zhao Fangkai, Yang Lei, Chen Liding, et al. Soil security in peri-urban ecosystems: Problems and challenges[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4109-4120.]

[17] 姚焱中, 李诗婷, 苏美蓉, 等. 区县生态系统健康评价方法——以东莞市各镇区为例[J]. 生态学报, 2021, 41(15): 5998-6011. [Yao Yanzhong, Li Shiting, Su Meirong, et al. County ecosystem health assessment: A case study of 32 counties in Dongguan City, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 5998-6011.]

[18] 樊杰. 我国国土空间开发保护格局优化配置理论创新与"十三五"规划的应对策略[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(1): 1-12. [Fan Jie. Theoretical innovation in optimization of protection and development of China's territorial space and coping strategy of 13th Five-Year Plan[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(1): 1-12.]

[19] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 等. 生态安全格局研究的主要内容与进展[J]. 生态学报, 2018, 38(10): 3382-3392. [Ye Xin, Zou Changxin, Liu Guohua, et al. Main research contents and advances in the ecological security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (10): 3382-3392.]

[20] Tayyebi A, Pijanowski B C, Pekin B. Two rule-based urban growth boundary models applied to the Tehran Metropolitan Area, Iran[J]. Applied Geography, 2011, 31(3): 908-918.

[21] Kong F, Yin H, Nakagoshi N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling[J]. Landscape & Urban Planning, 2010, 95(1-2): 16-27.

[22] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19 (1): 10-17. [Yu Kongjian. Landscape ecological security patterns in biological conservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 10-17.]

[23] 赵晓峰, 王金林, 王珊珊, 等. 基于MCR模型的卡拉麦里地区生态安全格局变化研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1396-1406. [Zhao Xiaofeng, Wang Jinlin, Wang Shanshan, et al. Changes of ecological security pattern in Kalamaili region based on MCR models[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1396-1406.]

[24] 自然资源部. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(试行)[DB/OL]. [2020-01-19]. http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200121_2498502.html. [Ministry of Natural Resources. Technical guidelines for evaluation of resources and environment carrying capacity and suitability of land and space development (Trial) [DB/OL]. [2020-01-19]. http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200121_

2498502.html.]

[25] 潘竟虎, 王云. 基于CVOR和电路理论的讨赖河流域生态安全评价及生态格局优化[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2582-2595. [Pan Jinghu, Wang Yun. Ecological security evaluation and ecological pattern optimization in Taolai River Basin based on CVOR and circuit theory[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2582-2595.]

[26] 李涛, 巩雅博, 戈健宅, 等. 基于电路理论的城市景观生态安全格局构建——以湖南省衡阳市为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2555-2564. [Li Tao, Gong Yabo, Ge Jianzhai, et al. Construction of urban landscape ecological security pattern based on circuit theory: A case study of Hengyang City, Hunan Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7): 2555-2564.]

[27] 童亮, 姚晓洁, 王霞. 基于电路理论的农耕平原地区生态安全格局构建: 以亳州市为例[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(11): 217-226. [Tong Liang, Yao Xiaojie, Wang Xia. Construction of ecological security pattern in agricultural plains based on circuit theory: A case study of Bozhou City[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(11): 217-226.]

[28] 张萌, 刘吉平, 赵丹丹. 吉林省西部生态安全格局构建[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1676-1685. [Zhang Meng, Liu Jiping, Zhao Dandan. Construction of ecological security pattern in western Jilin Province[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1676-1685.]

[29] 申陆, 田美荣, 高吉喜, 等. 浑善达克沙漠化防治生态功能区防风固沙功能的时空变化及驱动力[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 73-82. [Shen Lu, Tian Meirong, Gao Jixi, et al. Spatio-temporal change of sand-fixing function and its driving forces in desertification control ecological function area of Hunshandake, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 73-82.]

[30] 高梦雯, 胡业翠, 李向, 等. 基于生态系统服务重要性和环境敏感性的喀斯特山区生态安全格局构建——以广西河池为例[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2596-2608. [Gao Mengwen, Hu Yecui, Li Xiang, et al. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecosystem services and environmental sensitivity in karst mountainous areas: A case study in Hechi, Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2596-2608.]

[31] 于德永, 潘耀忠, 姜萍, 等. 东亚地区植被净第一性生产力对气候变化的时空响应[J]. 北京林业大学学报, 2005(增刊2): 96-101. [Yu Deyong, Pan Yaozhong, Jiang Ping, et al. NPP of east Asian vegetations to climate changes[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005(Suppl. 2): 96-101.]

[32] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于GIS和RS的区域陆地植被NPP估算——以中国内蒙古为例[J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 300-307. [Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Long Zhonghua, et al. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS: A case study in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(3): 300-307.]

[33] 吴健生, 张理卿, 彭建, 等. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4125-4133. [Wu Jiansheng, Zhang Liqing, Peng Jian, et al. The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4125-4133.]

[34] 彭建, 郭小楠, 胡熠娜, 等. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建——以云南省玉溪市为例[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 627-635. [Peng Jian, Guo Xiaonan, Hu Yina, et al. Constructing ecological security patterns in mountain areas based on geological disaster sensitivity: A case study in Yuxi City, Yunnan Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 627-635.]

[35] 朱琪, 袁泉, 于大炮, 等. 基于电路理论的东北森林带生态安全网络构建[J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3463-3473. [Zhu Qi, Yuan Quan, Yu Dapao, et al. Construction of ecological security network of northeast China forest belt based on the circuit theory[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(11): 3463-3473.]

[36] 杜雨阳, 王征强, 于庆和, 等. 基于生境质量模型和电路理论的区域生态安全格局构建——以秦岭(陕西段)为例[J/OL]. 农业资源与环境学报. [2021-12-01]. https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0531. [Du Yuyang, Wang Zhengqiang, Yu Qinghe, et al. Construction of a regional ecological security pattern based on a habitat quality model and circuit theory: A case study of the Qinling Mountains (Shaanxi Section) [J/OL]. Journal of Agricultural Resources and Environment. [2021-12-01]. https://doi.org/10. 13254/j.jare.2021.0531.]

[37] 倪庆琳, 丁忠义, 侯湖平, 等. 基于电路理论的生态格局识别与保护研究——以宁武县为例[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(5): 67-73. [Ni Qinglin, Ding Zhongyi, Hou Huping, et al. Ecological pattern recognition and protection based on circuit theory[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(5): 67-73.]

Ecological security pattern at county level in northeast forest area of China from the perspective of ecological importance: A case of Arun Banner in Hulun Buir City

LI Yitong[1,2], RONG Lihua[1], LI Wenlong[3,4], CHENG Lei[2]

(1. Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 2. China Academy of Building Sciences Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot 010070, Inner Mongolia, China; 4. Institute of Geographical Sciences and Resources/Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The construction of ecological security plans at county level is of great significance for ensuring the ecological security and optimizing ecological spatial planning at a county level in China. Based on the evaluation of results related to the importance of ecosystem services in Arun Banner, Hulun Buir City, Inner Mongolia, China, this study uses a landscape morphological spatial pattern analysis to identify the ecological core area as the ecological source area and construct a resistance grid based on ecological resistance and ecological threat factors. In this work, circuit theory was used to identify an ecological corridor; Linkage Mapper was used to identify the improvement areas in the ecological corridor. Based on this, a comprehensive ecological security plan for Arun Banner was constructed. The results showed that: (1) The most ecologically important area of Arun Banner has an areas of 4181.66 km^2, which accounts for 37.80% of the whole banner area, and the ecologically important area was 2174.50 km^2, accounting for 19.80% of the whole banner area. (2) There are 33 ecological source areas that cover an area of 1141.00 km^2, which accounts for 10.30% of the total area of the study area; these areas are mainly distributed in the north of the banner region, and tree forest is the main type of ecological source land. (3) A total of 73 ecological corridors were identified, including 62 key corridors and 11 potential corridors; these corridors had a total area of 1884.80 km^2. The network structure of the ecological corridors was complete. These corridors were more concentrated in the north and less frequent in the south of the study region. (4) The area of specific pinch points was found to be 71.25 km^2, 38 important pinch points are identified in this work. The area of first-level improvement regions related to these pinch points was found to be 176.65 km^2; the majority of this area is located in the south of the banner region. The secondary improvement area was found to be 887.12 km^2; this area is mainly distributed in the south and northwest of the banner region. Planning activities should be carried out on the identified source areas and ecological corridors to ensure ecological security. This work provides an evaluation of the importance of the ecosystems studied and the identification of ecological source areas and ecological corridors based on the resistance factors. This work also comprehensively considers the importance of ecological processes in the construction of ecological security planning and provides a realistic path and scientific guidance for the optimization of territorial spatial pattern.

Key words: forest region; ecological security pattern; landscape morphology; circuit theory; ecological spatial planning; Arun Banner of Hulun Buir City